



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH

NEW METHODS ROARY FINISHING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

HANA CVOLIGOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Hana Cvoligová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nové metody dokončování tvarových ploch

v anglickém jazyce:

New methods roary finishing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Dokončování tvarových ploch vnějších.
3. Dokončování tvarových ploch vnitřních.
4. Porovnání jednotlivých metod.
5. Závěr s doporučením pro strojírenskou praxi.

Cíle bakalářské práce:

Studie zabývající se nejnovějšími metodami a technologiemi dokončování tvarových ploch. Porovnání jednotlivých metod a technologií s doporučením pro využití ve strojírenské praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK,O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno:Akademické nakladatelství CERM,2002.158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK,O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2003.193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG,W. Fertigungsverfahren band 1,2,3,4,5,6. 4.Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH,1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. Firemní podklady dle dalšího zpřesnění a určení (Sandvik Coromant, Gühring, Fette, Pramet, Mitsubishi, Iscar, Seco, apod.
5. REICHARD,A. Fertigungstechnik 1,2. 10.Aufl. Hamburg: Handwerk und technik,1993.420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.10.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce obsahuje přehled a porovnání konvenčních a nekonvenčních metod používaných k dokončování součástí. Technologie jsou rozdělené podle tvarových ploch na vnější a vnitřní a jsou popsány jak varianty s úběrem, tak i bez úběru materiálu. Kromě principů běžně používaných jsou zmíněny i nové, které teprve nacházejí uplatnění ve strojírenské praxi.

Klíčová slova

Metody dokončování, tvarové plochy, konvenční, nekonvenční, s úběrem materiálu, bez úběru materiálu.

Abstract

The work includes an overview and comparison of conventional and unconventional methods used in the finishing part. Technology has broken down into contoured surfaces on the outside and inside, they are described variants with stock removal, and without stock removal. In addition to standard principles are used, they are in question and new, that are to be used only in engineering practice.

Keywords

Methods of finishing, contoured surface, conventional and unconventional, with the stock removal material, without stock removal material.

Bibliografická citace

CVOLIGOVÁ, H. *Nové metody dokončování tvarových ploch..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s.,CD. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Nové metody dokončování tvarových ploch* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Hana Cvoligová

Poděkování

Děkuji tímto Ing. OSKARU ZEMČÍKOVÍ, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1 ÚVOD.....	8
2 ROZDĚLENÍ.....	9
3 DOKONČOVÁNÍ VNĚJŠÍCH PLOCH.....	10
3.1 Rotační plochy.....	10
3.1.1 Jemné soustružení.....	10
3.1.2 Vysokorychlostní soustružení.....	11
3.1.3 Jemné broušení.....	11
3.1.4 Broušení do plna.....	13
3.1.5 Lapování.....	14
3.1.6 Superfinišování	16
3.1.7 Kuličkování, balotínování	17
3.2 Nerotační plochy.....	17
3.2.1 Jemné frézování.....	17
3.2.2 Vysokorychlostní frézování.....	18
3.2.3 Ševingování.....	19
3.2.4 Broušení ozubených kol.....	20
3.2.5 Leštění.....	21
3.2.6 Tryskání.....	22
3.2.7 Vibrační zpevňování.....	25
3.2.8 Aerolap.....	25
4 DOKONČOVÁNÍ VNITŘNÍCH PLOCH.....	26
4.1 Rotační plochy.....	26
4.1.1 Válečkování.....	26
4.1.2 Elektrochemické obrábění.....	27
4.1.3 Obrábění ultrazvukem.....	27
4.2 Nerotační plochy.....	28
4.2.1 Elektroerozivní obrábění pomocí drátkové elektrody.....	28
4.2.2 Vyjiskřování	29
4.2.3 Leštění pulzním laserem	30
5 POROVNÁNÍ METOD.....	31
6 ZÁVĚR.....	32

Resumé

Seznam použitých zdrojů

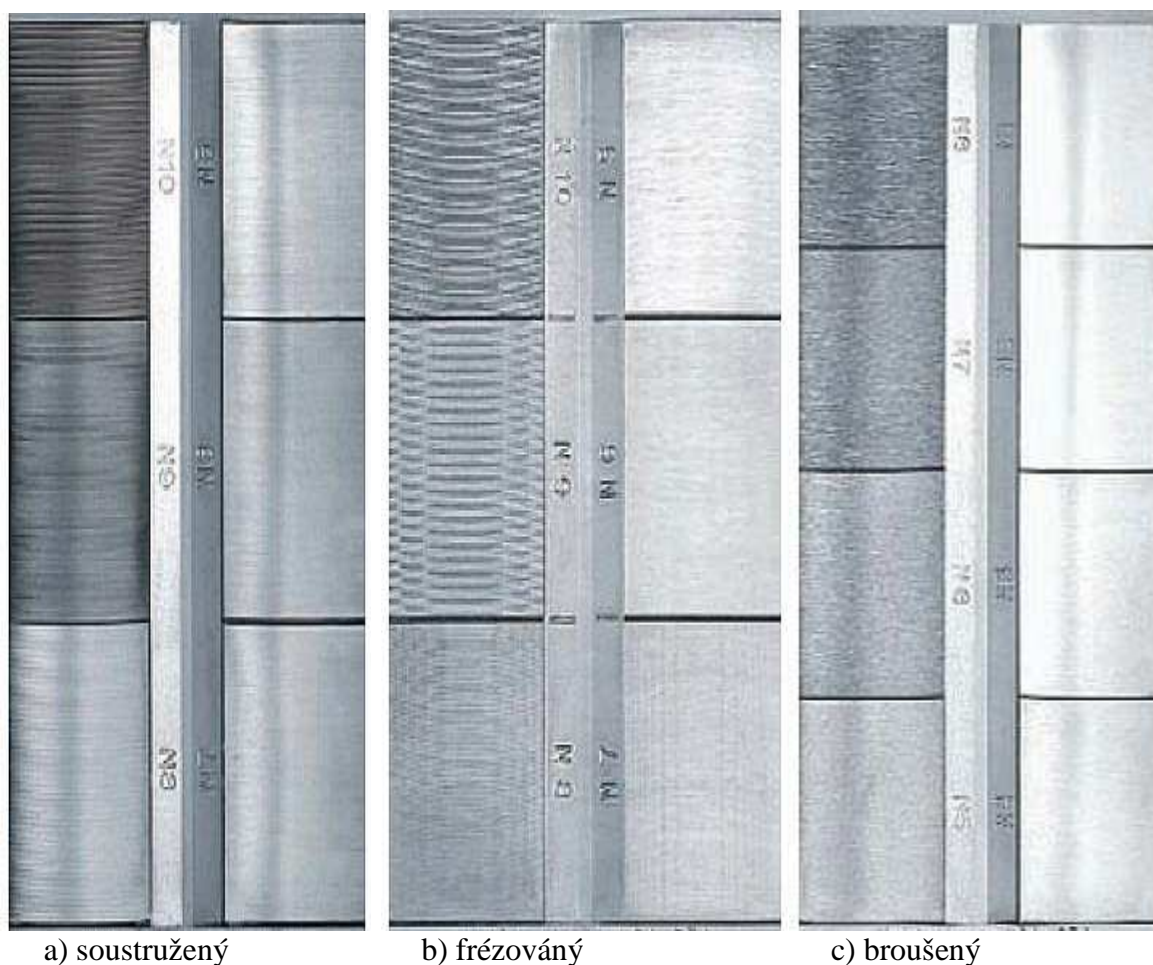
1 ÚVOD

V technické praxi je snahou vyrábět součásti s co nejmenšími náklady při splnění požadovaných vlastností. Kromě funkčních, např. mechanických a rozměrových, je vhodné dodržet i estetické, neboť nejen na konečné jakosti a textuře, ale i na vzhledu, závisí úspěch a prodej hotového dílu.

K dosažení finální podoby se hojně využívají tzv. dokončovací metody, které zajistí optimální mikrogeometrii povrchu současně se vzhledovými a morfologickými vlastnostmi. Jedná se o vhodnou kombinaci míry drsnosti a vlnitosti, fyzikální a chemické odolnosti a i dalších vlastností, které významně ovlivňují chování výrobku při používání. Příkladem může být korozní odolnost, lesk, vroubkování apod.

Při volbě optimální varianty dokončování je nutno zohlednit skutečnost, že jedinou metodou nemusí být dosaženo požadovaného výsledku a mnohokrát je třeba několik metod vzájemně zkombinovat.

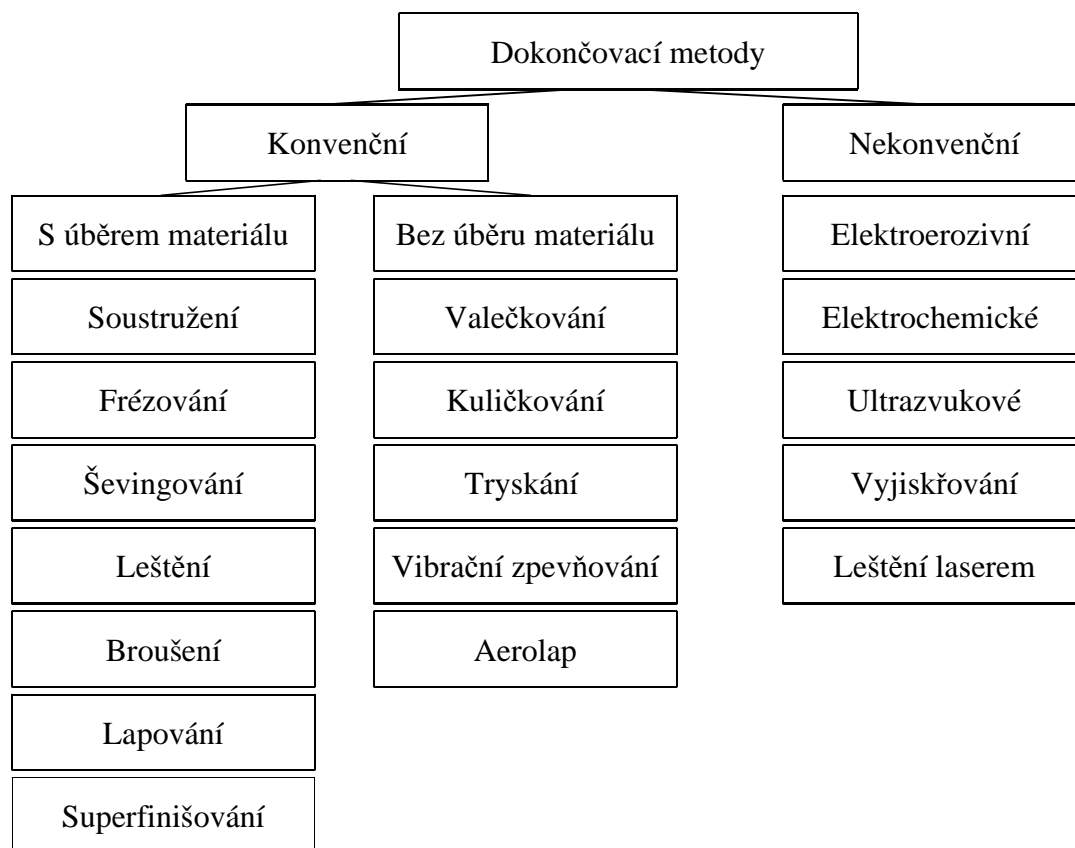
Práce se zaměří na přehled a popis jednotlivých metod dokončování spolu se zhodnocením významu a použitelnosti v praxi. Součástí rešerše budou nejen technologie v současné době běžně používané, ale i nové, které se do procesů výroby teprve zavádějí. Zmíněny budou i metody nedokončovací, které svou dosaženou drsností umožňují praktické použití zhotoveného výrobku bez dalších dodatečných nákladných operací.



Obr.1.1 Vzorkovnice povrchů³⁵

2 ROZDĚLENÍ

Dokončovací metody se dají rozdělit podle základních principů na konvenční a nekonvenční. Nekonenční jsou založené na fyzikálních jevech nebo chemických reakcích, bez silového působení nástroje. Konvenční spočívají v odstranění určitého přídatku na dokončení silovým působením a zahrnují varianty s úběrem a bez úběru materiálu. Přehled je uveden v obr.2.1.



Obr.2.1 Rozdělení metod

U technologií s úběrem materiálu je během výrobního procesu ponecháno na plochách více materiálu, než je na finálním výrobku potřeba. Přebytek se následně odstraňuje, čímž se docílí konečného tvaru a úpravy. Je třeba zajistit, aby odstranění probíhalo velmi jemně a nedošlo k tepelnému ovlivnění budoucí povrchové vrstvy. Odebráním přídatku se musí odstranit vady, které vznikly v předchozích fázích výroby. Jedná se např. o jemné porušení, tvarové nepřesnosti atd. Z těchto důvodů se výkon dané metody neposuzuje podle množství odebraného materiálu, ale podle požadované kvality plochy za jednotku času.

Při technologiích bez úběru materiálu se využívá plastické deformace povrchu. Při variantě za studena dojde k povrchovému zpevnění materiálu a ve většině případů nastává i zmenšení drsnosti následkem zatlačení nerovností. Také funkční vlastnosti vykazují jisté zlepšení, kdy vyvolaná zbytková pnutí eliminují negativní vlivy předchozích operací. Materiál projde kvalitativními zlepšeními, pozitivní změnou je zvýšení únavové pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti otěru a korozi. Opačný účinek však má plastická deformace za tepla. Zahřátím materiálu se sice docílí jeho větší tvárnosti, ale reakce na povrchu zahřátého kovu snižují výslednou jakost.

Dokončovací metody se dají rozdělit i podle použití na plochy vnější a vnitřní.

3 DOKONČOVÁNÍ VNĚJŠÍCH PLOCH

3.1 Rotační plochy

Rotačními plochami jsou myšleny plochy vzniklé rotací křivky kolem pevné přímky, neboli osy rotace. Mezi základní lze zahrnout výrobky vytvořené soustružením, speciálními případy je např. i zhotovování a dokončování závitů.

3.1.1 Jemné soustružení

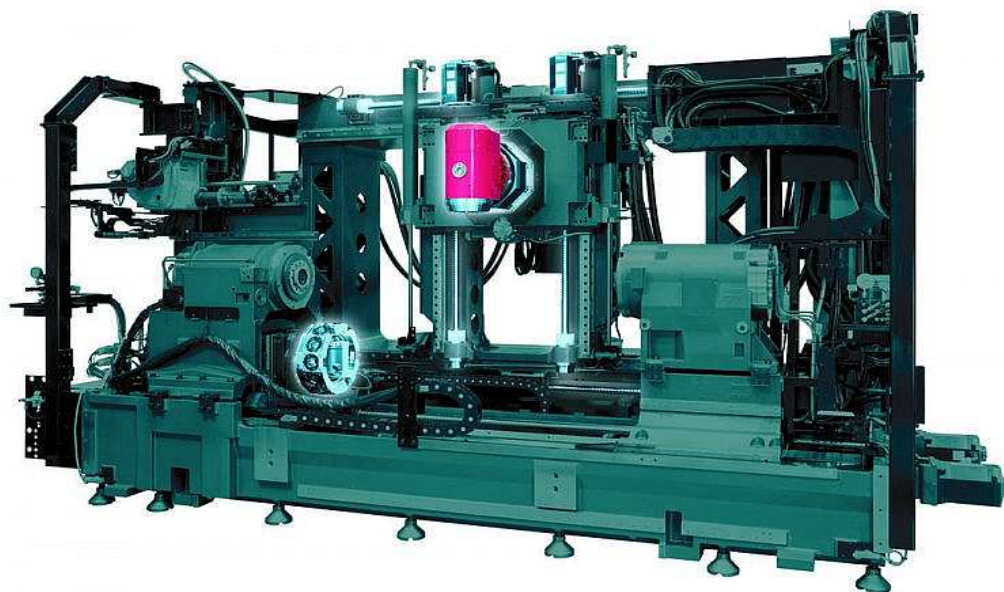
Mezi nejběžnější a nejčastěji používanou metodu dokončování lze zařadit jemné soustružení. Používá se pro dosažení maximální jakosti povrchu. Jedná se o třískovou obráběcí metodu, kdy hlavní řezný pohyb vykonává obrobek a vedlejší řezný pohyb vykonává nástroj (posuv a přísuv). Vyznačuje se malým posuvem a malým úběrem třísky při vyšších otáčkách. Úběr vrstvy se provádí za pomoci soustružnického nože s břitovými destičkami vyrobenými ze slinutých karbidů, kubického nitridu bóru nebo keramiky. Destičky musí být pro činnost dostatečně ostré a vhodně kalibrované ($1^\circ - 2^\circ$, 50 – 200 mm). Výsledný povrch dosahuje hodnot drsnosti $Ra = 0,4 - 1,6 \mu m$ a přesnosti stupně IT 5 - 6.^{4, 7, 13, 15, 26}

Nejčastěji se pro dokončovací operace volí obráběcí destičky ze směsné keramiky, které se upravují leštěním nebo povlakováním, např. nitridováním. Pro obrábění ocelí zušlechťených, kalených do 65 HRC, žáruvzdorných a nástrojových se použijí destičky s obsahem 60 - 65 % kubického nitridu boru. Vyšší obsah - okolo 90 % - se uplatní u obrábění tvrdých litin, slitin a kalených ocelí s velkým přídavkem na dokončení. Mezi destičkami se najde mnoho druhů, tvarů a velikostí (obr.3.1). Převážně se obrábí hřídele a další rotační součásti, včetně závitů.^{4, 7, 13, 15, 26}



Obr.3.1 Břítové destičky s povlakovaným povrchem²⁷

Pro dokončování se využívají obráběcí centra s více osami, aby bylo možné obrobit co největší množství rotačních tvarů na jedno upnutí. Vlastnosti upínací desky a vřetene a také vibrace ovlivňují dosaženou hodnotu drsnosti povrchů. Velkou roli hraje zejména statická tuhost, tvarová přesnost a uložení obrobku v upínací desce. Pro snížení vibrací vznikajících při řezném procesu se využívá technologie DCG (driven at the Centre Gravity), pohanění jednotlivých pohybových os v těžišti. Soustružnické centrum s tlumením vibrací je vidět na obr.3.2.^{11, 15, 19, 21, 26}



Obr.3.2 Víceosé soustružnické centrum s tlumením vibrací¹⁹

Velkou výhodou metody je, že dokončovací a výrobní operace lze provádět i současně, což šetří nejen čas, ale i náklady celého výrobního procesu. Podstatou je současné obrábění 2 noží, které jsou při soustružení za sebou nebo v revolverové „hlavě“ soustruhu.^{4, 13, 15,}

Pokud se ale má dosáhnout vyšší kvality, což je nezbytně nutné u výrobků s kontaktním stykem součástí, měli by se použít speciální metody, které pracují jemněji a přesněji.^{4, 11, 13, 15, 19, 21, 26, 27}

3.1.2 Vysokorychlostní soustružení

Mluví-li se o vysokorychlostním soustružení pohybuje se rychlost vřetena od 10 000 otáček za minutu a pracovní posuvy okolo $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Konkrétní volba závisí na materiálu obrobku. U těchto vysokých hodnot řezných rychlostí dochází ke změně struktury i mechanických vlastností třísky a teplota se přibližuje tavení materiálu obrobku. Odcházející materiál změkne a zmenší přitlačnou sílu na čelo břitu nástroje, tím se sníží třecí síla i řezný odpor. V důsledku těchto změn nenarůstá teplota třísky na hřbetě a čele nástroje. Při procesu se nechladí, výjimkou je pouze dokončování tenkostěnných obrobků a výrobků z korozivzdorných ocelí a hliníku. Moderní slinuté karbidy, keramika, kubický nitrid boru a diamant chlazení nepotřebují.^{13, 21}

Používají se speciálně upravená obráběcí centra s vysokou tuhostí a potřebným výkonem. Na břitové destičky se používá keramika na bázi oxidu hlinitého, zejména pak pro kalené oceli. Pro litinu šedou a povrchově kalenou se uplatňuje keramika na bázi křemíku. Destičky mají převážně kruhový tvar.^{11, 13, 15, 21}

3.1.3 Jemné broušení

Jemným broušením se rozumí odebírání velmi malé vrstvy materiálu brusným kotoučem za vysokých řezných rychlostí. Různé tvary a profily kotoučů zajistí dokončení velkého množství ploch - i závitů a ozubených kol.^{4, 7, 26}

Při použití brusných kotoučů ze super tvrdých materiálů se dosáhne kvalitnějšího povrchu než při použití klasických materiálů. Mezi tvrdé materiály patří diamant, který svou tepelnou a tvarovou stálostí uspokojí nejnáročnější potřeby při dokončování. Nevýhodou se stává jeho afinita se železem za vysokých teplot. U železných materiálů

bývá diamant nahrazován kubickým nitridem boru. Syntetický materiál plně nahradí diamant a v některých vlastnostech i překoná (vyšší chemická stálost a chemická odolnost). Vzhledem k těmto vlastnostem se dá využít na opracování materiálů tvrdých a kalených, které není možno běžnými způsoby broušení obrobit. Příkladem těchto materiálů jsou slinuté karbidy, keramické a žáruvzdorné materiály, rychlořezné a vysokolegované oceli, tvrzená litina a slitiny kobaltu s niklem.^{4, 7, 26}

K dosažení nejlepších výsledků se musí dodržet řezné podmínky. Brousí se rychlostí $60 - 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, přísluv stolu $0,2 - 0,6 \text{ mm}$ na zdvih, posuv $10 - 300 \text{ mm}$ za minutu. Podmínkou je i dostatečně intenzivní chlazení. Uvedené podmínky jsou doporučeny firmou Tyrolit, která super tvrdé kotouče vyrábí.^{4, 7, 26}

Tab.3.1 Velikost zrn v závislosti na použité metodě²⁶

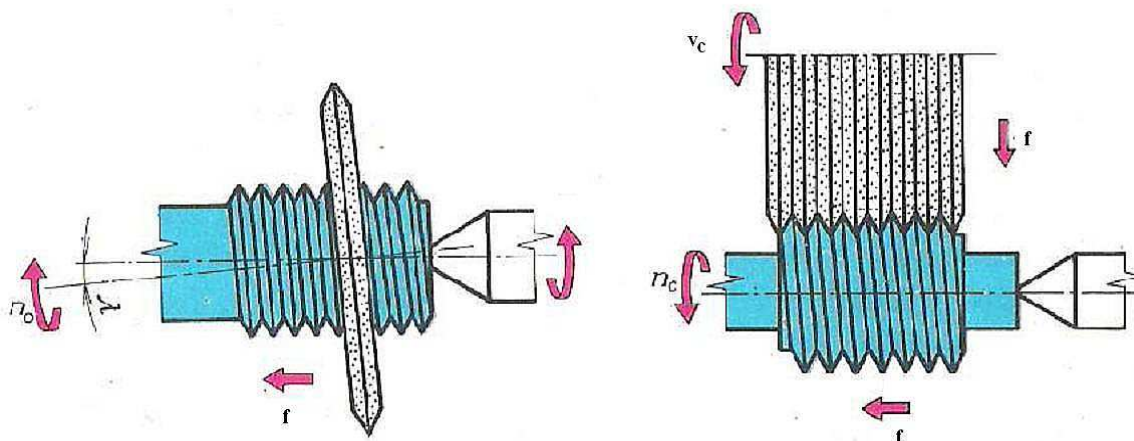
Metoda	Velikost zrna
dokončovací broušení	91 - 64 μm
jemné a dokončovací broušení	54 - 20 μm
leštění	15 - 1 μm

Při jemném broušení se využívají zejména CNC a NC stroje, protože dosahují nejvyšších přesností povrchu. Nastavitelnost os umožňuje obrábět i nepravidelné součásti s malou drsností povrchu po obrobení.^{4, 7, 26}

Tab.3.2 Zrnitost elborového prachu v brousících kotoučích a obdržená drsnost opracovaného povrchu pro kotouč z kubického nitridu bóru³⁹

Zrnitost v [μm]	Použití	Orientační drsnost povrchu R_a [μm]
200/160	hrubovací a polohrubovací broušení	1,0 – 0,8
160/125		0,6 – 0,45
125/100	polohrubovací broušení	0,4
100/80	univerzální broušení	0,3
80/63	dokončovací broušení	0,3 – 0,2
63/50		0,2
50/40	jemné dokončovací broušení	0,15
40/28		0,1
28/20	velmi jemné dokončovací broušení	0,1 – 0,05
20/14		0,05

Závity, u kterých je požadována vyšší přesnost (např. závitové nástroje a měřidla), se dokončují jednoprofilovým nebo hřebenovým kotoučem, viz obr.3.3.^{4, 7, 26, 39}



Obr.3.3 Broušení závitů²⁵

Jednoprofilový brousicí kotouč se vykloní o úhel stoupání a nastavuje se do plné hloubky profilu závitu. Zohledňuje se průměr kotouče, aby se dosáhla správná řezná rychlost. Za jednu otáčku se obrobek axiálně posune o jednu délku stoupání. Z důvodu nízké produktivity se častěji dokončuje hřebenovým nástrojem. Při jeho použití se obrobek také posouvá axiálně o jedno stoupání na otáčku. Vnitřní závity se dokončují obdobně s použitím malých kotoučů. Velmi jemné závity s roztečí do 1 mm lze brousit do plného materiálu.^{4, 7, 25, 26, 39}

Jednou z modifikací je i tzv. kopírovací broušení. Tvar dokončeného povrchu se přenáší pomocí kopírovacího zařízení na hřídel brusného kotouče. U nových strojů se objevuje i snímání šablony pomocí laseru. Podobá se jemnému broušení, hlavně v použitých materiálech brusných kotoučů. Dokončují se například vačky a vačkové hřídele. Přesnost metody závisí na vůlích a přesnosti kopírovacího systému.^{4, 7, 26, 39}

3.1.4 Broušení do plna

Princip se od jemného broušení liší pouze tím, že výrobek se zhotovuje z polotovaru rovnou na předepsanou kvalitu. Touto metodou se nejčastěji vyrábí nástroje, především vrtáky a frézy. Např. obr.3.4 znázorňuje vybroušení šroubovice vrtáku. Na opracování slinutých karbidů se používá kotouč z diamantu, pro nástrojové oceli z kubického nitridu boru.^{7, 14}



Obr.3.4 Výroba karbidového vrtáku³⁶

Předepsaná řezná rychlost okolo 80 m.s^{-1} a posuv 120 mm.min^{-1} jsou ovlivněny hloubkou řezu. Stroje musí mít velký výkon a vysokou tuhost. Dodávají se jako víceosé, většinou řízené digitálními programy. Ve výjimečných případech mohou mít i řízení ruční. Příklad stroje a výrobků je na obr.3.5 a 3.6.^{7, 14, 17, 36}



Obr.3.5 Pětiosá nástrojová bruska Saacke UWID¹⁷



Obr.3.6 Příklady frézovacích nástrojů vyrobených z plného materiálu ¹⁷

3.1.5 Lapování

Lapování je moderní metoda, která spočívá v jemném broušení pomocí brusných zrn rozptýlených v kapalině. Kromě kapaliny je možné využít i lapovací pastu, která obsahuje nejen brusná zrna, ale i další přísady zajišťující především její kompaktnost. Řezný pohyb je vyvoláván lapovacím nástrojem, který neustále mění dráhu a současně je proti lapované ploše přitlačován tlakem mezi 0,012 a 0,04 MPa. Metodou se dosáhne snížení drsnosti, zvýšení tvarové přesnosti a odstranění se vrcholky nerovností z předchozího obrábění. ^{5, 22, 38}

Brusná zrna jsou z různých materiálů, a to v závislosti na materiálu, z něhož je vyroben obrobek. Většinou se používá karbid křemíku, méně pak oxid hlinitý. Na obzvláště tvrdé materiály, jako jsou například slinuté karbidy, se užívá kubický nitrid boru nebo diamantový prach. V případě potřeby velmi jemného lapování se nabízí oxid železitý, hydroxid železitý, oxid chromu nebo uhličitán mangano-vápenatý. ^{5, 22}

Použitím různých kapalin, vyplňujících prostor mezi lapovacím strojem a obrobkem, je možno ovlivnit výkon celého procesu. Obecně platí, že čím viskóznější kapalina se použije a čím větší brusná zrna obsahuje, tím větší je i výkon. Mezi nejčastěji užívané výplňové kapaliny patří petrolej smíšený s lehkým olejem v poměru 1:1. ^{5, 22}

Lapovací nástroje mají přesně daný tvar, který je opačný (negativní) k lapované ploše, tj. pro vnější rotační plochy se používá miska nebo kroužek, pro díry lapovací trn. Nástroj se nejčastěji vyrábí z litiny, mědi a oceli (měkká či kalená), v některých případech lze použít i speciální plasty (např. při dokončování ozubených kol). ^{5, 22}

Lapovat je možno ručně nebo za pomoci stroje. Lze však rozlišit několik způsobů, které se liší především užitou kapalinou, jejím nanášením a pohyby, které zprostředkovávají působení brusných zrn na obráběné ploše. ^{5, 22}

- první způsob spočívá v plynulém dodávání suspenze brusných zrn v oleji do prostoru mezi obrobek a lapovací stroj a to buď čerpadlem (při strojovém) nebo štětcem (speciální miskou; při manuálním řízení procesu). Rychlost součástí závisí na jejich velikosti a pohybuje se v rozmezí $6 - 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ při ručním pohonu a až $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ při pohonu strojovém. Trajektorie lapovacího nástroje rovinných ploch je nepravidelná. ^{5, 22}

- druhá varianta je charakterizována stejnými pohyby jako způsob předchozí, ale liší se tím, že brusná kapalina či pasta se nanáší na lapovací nástroj předem.^{5, 22}
- třetí možnost se užívá při velmi jemném lapování, kde je nástroj z kalené oceli (může mít chromovaný povrch) a kapalinou je líc s rozptýlenými částicemi uhlíčitanu manganito-vápenatého. Tímto způsobem se dosáhne nejmenší možné drsnosti povrchu.^{5, 22}
- čtvrtým a zároveň nejvýkonnějším způsobem je tzv. chemicko - mechanické lapování, které využívá nejen brusného účinku zrn, ale i rozleptávání mikroskopické vrstvy lapovaného povrchu prostřednictvím různých kyselin. Tím je dosaženo efektivnějšího působení brusných zrn - při porovnání s předchozími způsoby pracuje až třicetkrát rychleji.^{5, 22}
- pátý způsob je velice zvláštní a mohlo by se zdát, že se vůbec nejedná o lapování. Jde totiž o zabrušování dvou součástí za absence lapovacího nástroje. Je velmi výhodný z hlediska dosažení dobrého slícování dvou součástí. Je s ním však spojeno riziko, že na lapovaných plochách zůstanou zbytky brusiva, které mohou dramaticky zkrátit životnost těchto dílců. S touto variantou se lze setkat například u lícování ventilu do sedla, vodovodního kohoutu do tělesa, při záběhu ozubených kol apod.^{5, 22}

Lapování zpravidla předchází operace broušení, kterou se upravuje povrch obrobku do požadované podoby včetně tloušťky přidané vrstvy, která se liší podle materiálu (tab.3.3.).^{5, 22}

Tab.3.3. Velikost přídavků na povrchu pro různé plochy⁵

kalené součásti na rovinných plochách	5 až 30 μm
díry, vnější válcové plochy	8 až 15 μm
nekalené součásti na rovinných plochách	6 až 14 μm

Lapování je jedna z nejkvalitnějších dokončovacích metod a pomocí této metody jde obrábět prakticky jakékoli vnější tvary z oceli, bronzu, mosazi a dalších kovů. Používá se k výrobě přesných komponentů, především kvůli přesnosti a malé hrubosti, které se pomocí této metody dosahuje. Dosahovaná jakost ploch je uvedena v tab.3.5. Všechny hodnoty nemusí být dosažitelné na běžně používaných strojích a za podmínek, které panují v provozech. Lapovat lze funkční plochy měřidel, ložiskové čepy hřídelí, povrchy valivých tělísek ložisek, plochy měřidel atd. Metoda se hodně využívá při výrobě dosedacích ploch součástek, které zabráňují pronikání nebezpečného plynu nebo kapaliny.^{3, 5, 22, 38}

Tab.3.5 Dosahovaná jakost lapovaných ploch⁵

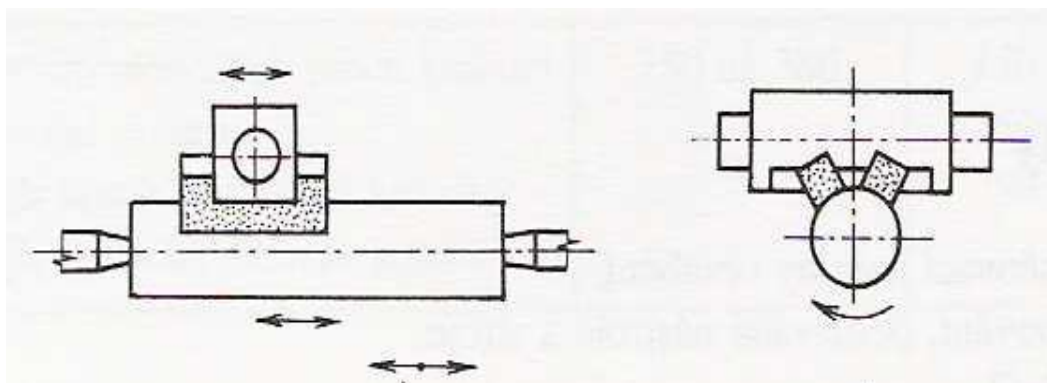
		vnější plochy	díry	rovinné plochy
přesnost rozměrů	velmi jemné	IT 1 až 2	IT 1 až 3	IT 1 až 3
	jemné	IT 3 až 4	IT 3	IT 3 až 4
	normální	IT 5	IT 4 až 5 IT 5 až 6	IT 4 až 5 IT 5 až 6
tvarová přesnost [μm]	velmi jemné	0,05 až 0,1	0,05 až 0,1	0,03 až 0,05
	jemné	0,11 až 0,5	0,11 až 0,5	0,05 až 0,5
	normální	0,6 až 1	0,51 až 1	0,6 až 1
drsnost povrchu R_a [μm]	velmi jemné	0,025 až 0,05	0,005 až 0,05	0,005 až 0,05
	jemné	0,06 až 0,1	0,051 až 0,1	0,01
	normální	0,11 až 0,2	0,11 až 0,4 0,2 až 0,4	0,1 až 0,2 0,2 až 0,4

Tab.3.4 Zrnitost elborového prachu - obdržená drsnost opracovaného povrchu pro kubický nitrid bóru³⁸

Zrnitost v [μm]	Použití	Orientační drsnost povrchu Ra [μm]
14/10	lapování	0,05 – 0,03
10/7		0,03
7/5	jemné lapování	0,03 – 0,025
5/3		0,025
3/2	velmi jemné lapování	0,015
2/1		0,015 – 0,01
1/0		0,01

3.1.6 Superfinašování

Superfinašování je metoda založená na přehlazování povrchu součásti brusnými kameny. Obrobek se otáčí a kameny vykonávají pohyb v ose obrobku a kmitají. Tím vytvářejí potřebný tlak a odebírají na součásti povrchovou vrstvu. Rychlost pohybu se opět liší v závislosti na obráběném materiálu. Používá se na dokončení vnějších a vnitřních rotačních ploch (obr.3.7), u rovinných je využívána velice zřídka.^{2, 5, 22}



Obr.3.7 Princip superfinašování²⁴

Tab.3.6 Přehled řezných podmínek²

Materiál	v_0 [m min ⁻¹]	s [min ⁻¹]	frekvence kmitání [kHz]
Kalená ocel	15 - 25	3,5	27 - 36
Ostatní kovy	3 - 40	2 - 6	21 - 77

Pro průběh superfinašování je nezbytné, aby došlo k vytvoření nosného kapalinového filmu mezi superfinašovacím strojem a obráběným předmětem. Toho se dosahuje plynulým přívodem kapaliny o určité viskozitě ke styčným plochám obou komponentů. Průběh celého procesu závisí právě na tloušťce tohoto filmu, který se dá regulovat pomocí zvětšování a zmenšování tlaku mezi superfinašovacím nástrojem a obrobkem. Na účinnost metody má vliv nejen tlak, ale i viskozita kapaliny a relativní rychlost stroje vůči obrobku.^{2, 5, 22}

Na začátku procesu je stroj ve styku pouze s nejvyššími vrcholky výstupků obrobku, proto je kontaktní tlak obrovský a tím dochází k odlamování třísek. Povrch se zahluje a dochází k zvětšování styčné plochy. Ve chvíli, kdy je styčná plocha natolik velká, že se tlak kamene zmenší a vyrovná se s hydraulickým kapalinového filmu, začne obráběcí kámen „plavat“ a superfinašování je ukončeno.^{2, 5, 22}

Superfinašovací kameny se vyrábí z elektrokorundu a podle použití se dělí na hrubovací a dokončovací. Na ocel a měkké kovy se používají kameny z karbidu uhlíku, na vysoce legovanou ocel kameny z kubického nitridu boru ukotvené keramickou vazbou. Pro slinuté

karbidy je nejvhodnější diamant s organickou vazbou.^{2, 5, 22}

Superfinašovací soustava je složená ze 14 kamenů. Kapalina, z níž se vytváří film je tvořena směsí petroleje a 10 - 25 % vřetenového oleje, který však může být nahrazen 10 % olejem turbínovým. Procesu superfinašování předchází broušení, na jehož konci se nechává přídavek 2 - 5 μm (max. 20 μm). Velkou výhodou této metody je vysoká výkonnost a hospodárnost. Superfinašování s vysokým stupněm kvality trvá zpravidla kolem 60 vteřin. Dosahuje drsnosti 0,15 - 0,025 μm . Superfinašují se např. čepy pro kluzká uložení, valivé prvky ložisek nebo součásti hydrauliky. Příklad stroje na superfinašování je uveden na obrázku 3.8.^{2, 5, 22, 24, 32}



Obr.3.8 Stroj Supfina Ballflex na superfinašování koulí a kulových tvarů³²

3.1.7 Kuličkování, balotinování

Nástroj pro vyhlazování je tvořen ocelovou klecí, která je vyrobena z konstrukční oceli. Na ní jsou připevněny různé nástroje specifického tvaru, které jsou silovým působením přitlačovány na povrchovou vrstvu dokončovaného povrchu, čímž se dosáhne plastické deformace za studena. Řezná rychlost se volí podle materiálu a drsnosti obrobeného povrchu před vyhlazováním. Pokud bude mít povrch Ra 2 - 2,5 μm lze dosáhnout jakosti Ra 0,1 - 0,2 μm .^{5, 22, 34}

Metodou se ovlivňuje především drsnost a hloubka zpevnění. Proces lze regulovat tlakem, rychlostí pohybu a posuvu, počtem přejezdů i úpravou tvaru a materiálu tvářecího tělíska. Kvalitu metody velice ovlivňuje chlazení a mazání. Největší výhodou kuličkování je velká jednoduchost, která pramení z nenáročnosti výroby a možnosti použít jednotlivé pracovní nástroje i na běžných strojích.^{5, 22, 34}

3.2 Nerotační plochy

3.2.1 Jemné frézování

Frézování je strojní třískové obrábění kovů vícebřitým nástrojem, kde hlavní pohyb (rotační) koná nástroj a vedlejší pohyb (přisuv, posuv) obrobek. Metoda jemného frézování je podobná jemnému soustružení, ovšem s využitím u nerotačních ploch. Principem je malý úběr materiálu prostřednictvím nástroje s destičkami ze slinutých karbidů, kubického nitridu boru nebo keramiky, viz obr.3.9. Břítové destičky se upevňují na těleso vytvořené z nástrojové oceli (obr.3.10), čímž se snižuje cena nástroje. Výhodnou se metoda jeví pro

drsnosti 0,4 - 0,8 μm a stupně přesnosti IT 5 - 6. Dokončení výrobku se provádí na jednom stroji bez nutnosti další manipulace, čímž se šetří výrobní náklady a zvyšuje přesnost. Běžně probíhá ve třech osách, ve více než třech osách pracují více-osá centra.^{11, 12, 15, 20, 21, 39}



Obr.3.9 Karbidové destičky pro super tvrdé materiály³⁹



Obr.3.10 Povlakovaná břitová destička mechanicky upevněná na tělese³⁹

3.2.2 Vysokorychlostní frézování

Metoda vysokorychlostního frézování vychází z jemného, kdy rychlosti dosahují 15000 - 50000 otáček za minutu. Rychlost závisí na obráběném materiálu, neboť každý má jinou hranici tzv.vysoké řezné rychlosti, což bylo vysvětleno a popsáno v kap.3.1.2 u vysokorychlostního soustružení. Chlazení se ve většině případů nevyužívá. Břitové destičky jsou kruhového tvaru (někdy s ploškami, obr.3.11).^{12, 15, 20, 21,}



Obr.3.11 Nástroje pro vysokorychlostní obrábění od firmy Hofmeister ¹⁶

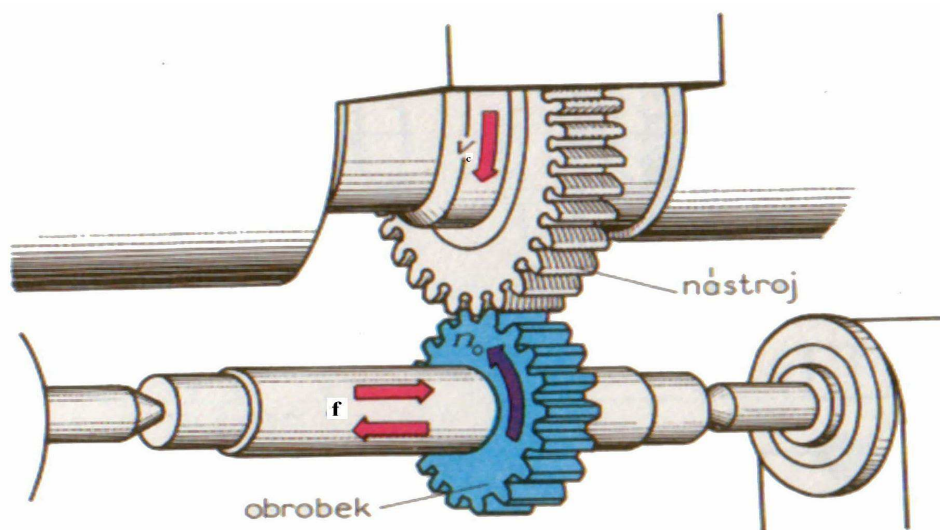
Metodou se dokončují např. formy na odlitky nebo zápustky a v některých případech nahrazuje vyjiskřování. Lze obrobit stěnu šířky 0,2 mm vysokou 20 mm za podmínky souměrného frézování s co nejmenší dobou kontaktu. Vysokorychlostní frézování snižuje náklady a zvyšuje produktivitu při dokončování nebo obrábění běžných i kalených ocelí. Dosáhne se drsnosti až $0,2\text{ }\mu\text{m}$. Nevýhodou se stává opotřebení stroje (ložisek, kuličkových šroubů a vodítek). Nástroje, adaptéry a šrouby se musí pravidelně kontrolovat na únavové trhliny a stroj musí být vybaven bezpečnostním krytem (obr.3.12). Z důvodu bezpečnosti se nedoporučuje používat těžké nástroje a nástroje z rychlořezné oceli. Musí se zabezpečit dostatečně kvalifikovaná pracovní síla na ovládaní stroje a softwaru. Nouzové zastavení stroje se nedá použít, z toho plyne potřeba simulovat proces obrábění před použitím ve výrobě. ^{11, 12, 15, 16, 18, 20, 21, 39}



Obr. 3.12 Vysokorychlostní obráběcí centrum Sodick HS430L ¹⁸

3.2.3 Ševingování

Používá se na dokončování nezakalených ozubených kol. Metoda spočívá v úběru velmi malé třísky klouzáním spolu zabírajících mimoběžných kol (obr.3.13). Zmíněného klouzání se dosáhne zkřížením os a záběrem 2 evolventních ploch. Osy se kříží o 5° až 15° . Za použití diagonálního ševingování se nástroj posouvá šikmo se zkřížením os 10° - 25° . Záběr nástroje a obrobku je bez vůle ^{5, 22}

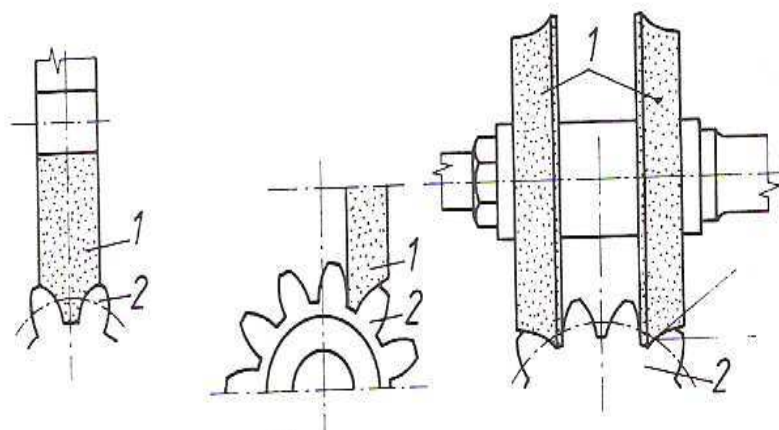
Obr.3.13 Záběr ševingovacího a ozubeného kola⁶

Ševingovací nástroj, viz obr.3.14, používá přesné ozubené přímé nebo šikmé kolo s drážkami na bocích zubů, pomocí nichž je odebrán materiál. U malých průměrů koná přídatný vratný pohyb obrobek, u velkých průměrů ozubených kol nástroj. V krajních úvratích se změnil smysl otáčení. Metodou se zlepšil tvarová přesnost úchylky profilu, vlnitosti a drsnosti povrchu zubů. Počet zdvihů nutných k odebrání přídatku se různí podle použitého způsobu ševingování. Při podélném je potřeba až 16 zdvihů s radiálním přířuvem a 4 zdvihy bez přířuvu k obrobku, při diagonálním 4 - 6 zdvihů při radiálním přířuvu.^{5, 6, 22, 31}

Obr.3.14 Ševingovací kotouč³¹

3.2.4 Broušení ozubených kol

Broušení ozubených kol se provádí způsobem dělicím s použitím tvarových kotoučů (obr.3.15) nebo odvalovacím. Při dělicím způsobu má kotouč tvar zubové mezery a postupně brousí každou jednotlivou mezeru zvlášť. Jinou variantou je použití kotouče s tvarem poloviny zubové mezery, kde se musí použít dvou nástrojů - jeden pro levou a jeden pro pravou stranu. Obrábí se postupně každý zub z obou stran. Nevýhodou je nutnost mít pro každý modul a počet zubů jiný kotouč. Přesnost závisí na profilu brousícího kotouče.^{4, 25}



1 - nástroj
2 - obrobek

Obr. 3.15 Dělicí způsob broušení ozubených kol ²⁵

Odvalovací způsob využívá místo kotouče šnek, který nekonečným počtem odvalovacích obalových profilů vytváří konečný tvar ozubeného kola. Metoda je vhodná k dokončování kol s malým modulem nebo průměrem. Přesnost výroby ovlivňuje stoupání, profil šneku a jeho vyvážení. Průměr kotouče bývá 300 - 400 mm. ^{4, 25}

3.2.5 Leštění

Leštěním se rozumí dokončovací operace, kdy se kotoučem z obrobeného povrchu odstraní nečistoty (oxidy, nitridy) a zbytky po předchozí práci s obrobkem. K úběru materiálu dochází minimálně. Hlavním cílem je zlepšení vzhledu daného předmětu. Leštěním nedochází ke změně tvaru ani rozměrů obrobené plochy, ani se příliš nedá snížit drsnost povrchu. Jde v podstatě o zlepšení estetické stránky, a to především zvýšením lesku. Nejčastěji se k leštění využívá papírových či plstěných kotoučů, které se otáčejí kolem obrobku rychlostí 5 až 30 m·min⁻¹. Příklad používaných kotoučů je na obr.3.16 a 3.17. ^{7, 8, 9, 26}



Obr.3.16 Druhy plstěných kotoučů na leštění ⁸

Obr.3.17 Filcové kotouče na leštění⁹

3.2.6 Tryskání

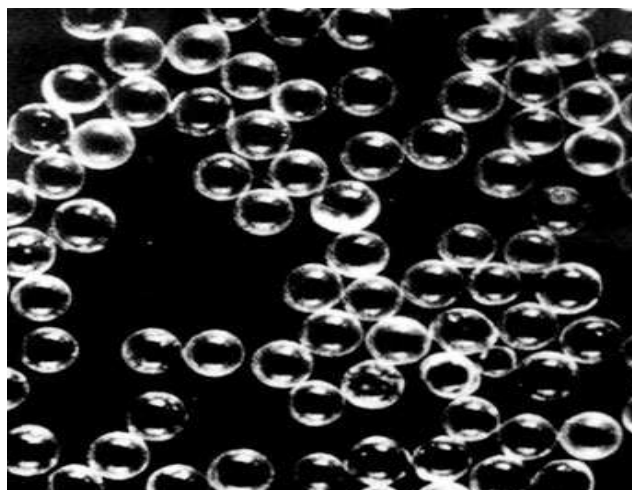
Tryskání je dokončovací operace, kdy se z vrcholků nerovností povrchu součástí odstraní částičky materiálu drtí, která je unášena proudem kapaliny, stlačeným vzduchem nebo mechanicky metána. Jako abrazivní materiály se využívají např. ocelové broky, křemičitý písek, ocelová a plastová drť, granuláty či struska (obr.3.18 až obr.3.21). Částičky se oddělují díky kinetické energii zrn^{5, 22}

Tab. 3.4 Materiály pro tryskání³⁴

neinvazivní tryskání	plastový granulát
dekorativní tryskací prostředky	balotina (skleněné kuličky)
	keramický granulát
	nerezový granulát
	mosazný granulát
čištění, matování a úběr materiálu	korund
	granát
	ocelová drť
	litinová drť
zpevňování povrchu (kuličkování)	ocelový granulát
	balotina
	keramický granulát
	sekaný drát



Obr.3.18 Plastová drť ³⁴



Obr.3.19 Skleněné kuličky na balotínování ³⁴

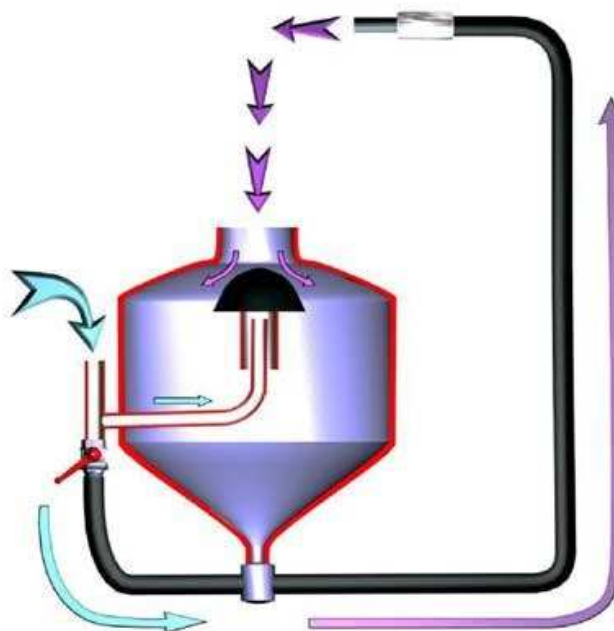


Obr.3.20 Drcený korund ³⁴

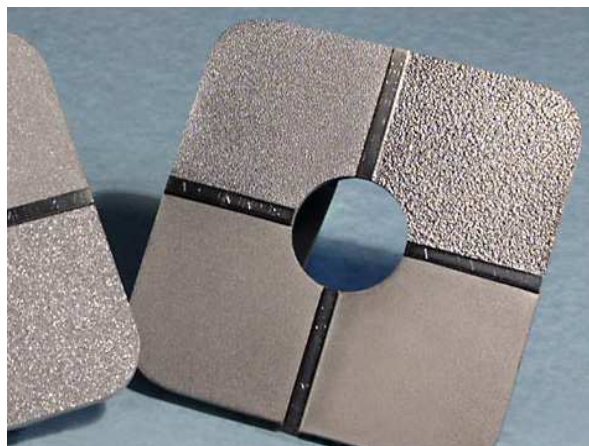
Obr.3.21 Ocelové kuličky³⁴

Při jemném tryskání se využívá kapaliny v poměru 75 : 21,5 : 3,5 (kapalina : brusná zrna : soda). Pracovní kapalinou je většinou voda, která je však obohacena o antikoroziční látky. Pokud je požadována i estetická stránka povrchu výrobku, lze do vody přidávat leštící látky, mýdla či glyceroly.^{5, 22}

Proud brusiva je na obráběný povrch vrhán pistolí pod tlakem 0,45 až 0,6 MPa, nebo se používá mechanické metání lopatkami metacího kola, otáčejícího se rychlostí 2 500 až 8 000 otáček za minutu. Schéma jemného tryskání je na obr.3.22.^{5, 22, 34}

Obr.3.22 Princip tryskání³⁴

Metoda je vhodná pro součásti, které mají členitý tvar a jinými technologiemi by šly dokončit velmi obtížně nebo vůbec. Běžná doba procesu je mezi 1 a 4 minutami. Dosažená drsnost je 0,1 až 0,8 μm . Porovnání povrchu po tryskání je na obr.3.23.^{2, 5, 22}

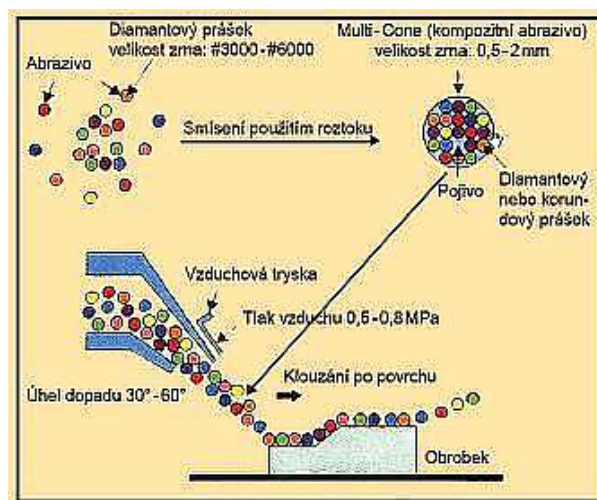
Obr.3.23 Různé druhy povrchů po tryskání ²

3.2.7 Vibrační zpevňování

Cílem metody je plastická deformace povrchové vrstvy, které je dosaženo částicemi dopadajícími na povrch předmětu. K běžnému urychlení se využívají vibrace, u speciálních těžkých částech (např. ocelové kuličky) se energie uděluje rotací ve třech osách (případně se užije i 4. šikmá osa). Výsledný vektor těchto pohybů by však měl být kolmý k upravované ploše. Vibrační zpevňování se vylepšuje ultrazvukem. Zdroj ultrazvukových vln rozkmitá upravovaný povrch, na něj dopadají ocelové kuličky a společným vibračním účinkem jej zkvalitní. ^{5, 22}

3.2.8 Aerolap

Technologie vyvinutá z lapování pro získání zrcadlového lesku. Vysokou rychlostí dopadající kompozitní elastické částice jemně brousí a leští dokončovaný povrch (obr.3.24). Částice jsou z korundového nebo diamantového prachu spojeného pojivem. Používá se speciální pojivo, které zajišťuje adhezi částic, čímž je dosaženo optimální pružnosti. Dokončují se zejména tvarové plochy zápustek, forem, raznic a řezných nástrojů. Výhodami procesu je snadné lapování různých ploch bez složité přípravy nástrojů, homogenita struktury povrchu, zvýšení trvanlivosti a životnosti forem a zápustek a prodloužení životnosti PVD a CVD povlaků. ^{10, 40}

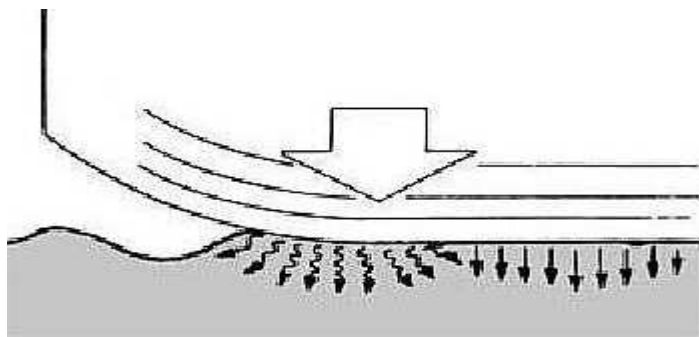
Obr.3.24 Mechanismus aerolapu ¹⁰

4 DOKONČOVÁNÍ VNITŘNÍCH PLOCH

4.1 Rotační plochy

4.1.1 Válečkování

Válečkování je beztržisková metoda, která zlepšuje kvalitu povrchu bez úběru materiálu. Princip spočívá v přitlačení odvalovaného tvrdého prvku na povrch součásti, čímž je na povrchu vyvinut tlak překračující mez kluzu materiálu, viz obr.4.1. Na povrchu obrobku se srovnají výstupky a prohlubně a tím se povrch zhutní a zrovnoměří. Velkou výhodou hloubka ovlivněné povrchové vrstvy, která ve větší než je obvyklé u ostatních metod (zpevnění povrchové vrstvy je až do 10 mm). Po skončení procesu je dosaženo vyhlazeného povrchu a rozměry jsou zkalibrovány s přesností na tisíciny milimetru. Metoda je vhodná pro vnější, ale i vnitřní dokončování rotačních, rovinných a přímkových ploch. Pro kvalitní výsledky procesu je krom potřebné tvářecí síly a jejího průběhu nutno vzít v úvahu i tělíska (materiál a množství), rychlost pohybu, množství přídavku, mazání a počet nájezdů.^{5, 22}



Obr.4.1 Princip válečkování²³

Podle principu se rozlišují druhy válečkování:

- zapichovací nebo podélné (s posuvem)
- statické (síla je konstantní, nebo je natolik minimální, že se uvádí jako nulová)
- dynamické (je založené na rázech a vibracích)
- přímé (prosté válení po materiálu)
- šikmé (kombinace válení a smyku)

Rychlost válečkování se volí v rozmezí $0,05 - 0,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Kvalita povrchu se pochybuje $0,1 - 0,05 \text{ } \mu\text{m}$.

Konstrukce nástroje se liší podle způsobu jeho použití. Odpružené nástroje jsou vhodné pro vyhlazování, zatímco pevné pro zpevňování a kalibrování. Příklady nástrojů jsou uvedeny na obr.4.2.^{5, 22, 23, 37}

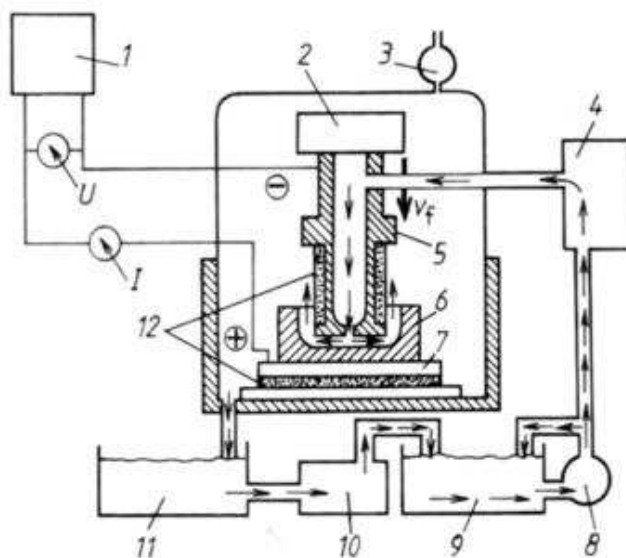


Obr.4.2 Nástroje pro válečkování³⁷

4.1.2 Elektrochemické obrábění

Princip je založen na elektrolýze. Obrobek připojený jako anoda se ponoří do elektrolytu spolu s nástrojem, který tvoří katodu. Při průchodu elektrického proudu dochází k reakci mezi anionty kovu a kationty elektrolytu. Na povrchu anody se postupně odebírá materiál ve tvaru katody. Dají se dokončovat pouze elektricky vodivé materiály. Špatně se obrábí šedá litina, slitiny s velkým množstvím uhlíku a duraly s obsahem křemíku. ^{5, 22, 28, 30}

Množství odebraného kovu závisí na nejmenší mezeře mezi elektrodami, udržení vzdálenosti, teplotě, rychlosti proudění a složení elektrolytu. Elektrolyt bývá složen z různých druhů solí. Používá se k hloubení dutin zápusťek, hloubení malých tvarových otvorů, obrábění vnějších tvarových ploch, dělení materiálu a odebírání otřepů. Příklad zařízení pro elektrochemické hloubení je na obr.4.3. ^{5, 22, 28, 29, 30}



- 1 - napájecí zdroj
- 2 - mechanismus posuvu
- 3 - odsávání
- 4 - filtr
- 5 - nástroj
- 6 - obrobek
- 7 - pracovní stůl
- 8 - čerpadlo
- 9 - zásobník elektrolytu
- 10 - filtr
- 11 - nádrž s elektrolytem
- 12 - izolace

Obr.4.3 Schéma zařízení pro elektrochemické hloubení dutin ²⁹

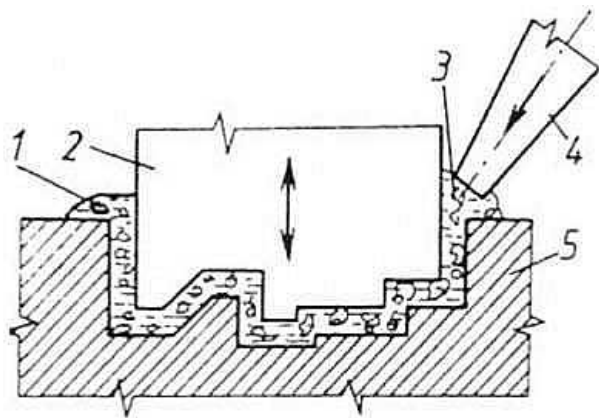
Při výrobě součásti se katoda přibližuje k obrobku a má jeho negativní tvar. Rychlost přísuvu ovlivňuje přípustná teplota, rovnoměrný přívod elektrolytu a rychlost rozpouštění anody. Přísuvová rychlost se pohybuje od 0,05 - 10 mm.min⁻¹. Před nechtěným úběrem se materiál může chránit izolací, nejčastěji se používá pryskyřice. Tvar nástroje se určuje výpočtem podle specializovaných příruček a návrh se experimentálně ověřuje. Katoda se vyrábí z mosazi, mědi, korozivzdorné oceli, grafitu a nebo kompozice (měď a grafit). Dosahovaná přesnost tvaru je $\pm 0,01 - 0,2$ mm a drsnost Ra 0,2 - 2 μm . ^{5, 22, 28, 29, 30}

4.1.3 Obrábění ultrazvukem

Při obrábění ultrazvukem se materiál odstraňuje pohybem abrazivních zrn mezi nástrojem a obrobkem. Nástroj se přibližuje stálou silou a rozkmitává zrna, viz obr.4.4. Kmitání je kolmé k obráběnému povrchu s frekvencí 18 až 25kHz, čímž dochází k překopírování nástroje na obrobek. V některých případech může nástroj vykonávat i pohyb přímočarý posuvný nebo rotační (obr.4.5). Činná část nástroje má tvar obráběné plochy a vyrábí se z oceli (konstrukční, korozivzdorná), mědi nebo mosazi. Její opotřebení závisí nejen na materiálu vlastního nástroje, ale i na materiálu obrobku a pracovních podmínkách. Obrábí se kovové i nekovové materiály a vždy je nutná kontrola dokončené části. Plasty obrábět nelze. ^{5, 28, 29, 30}

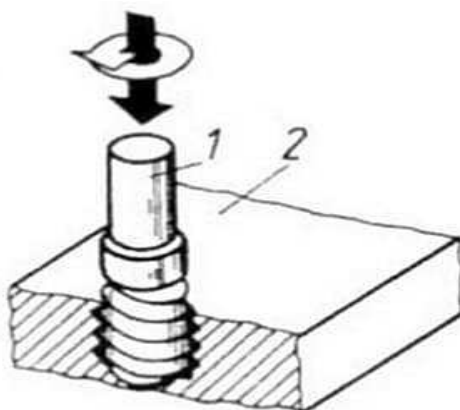
Velikost odebírané plochy závisí na amplitudě kmitů nástroje 30 až 80 μm , velikosti přítlaku (2 až 30N.cm⁻²) a na koncentraci, zrnitosti a druhu brusiva v kapalině.

K největšímu úběru dochází ve směru kmitání nástroje. Naopak na bočních plochách se ubírá méně intenzivně. Velikost zrna přibližně odpovídá ubírané velikosti materiálu. Koncentrace zrn v kapalině dosahuje hodnot 30 až 100 000 na 1cm^2 , což ovlivňuje počet spolu zabírajících zrn. Drsnost obrobené plochy dosahuje $0,4 - 1,6 \mu\text{m}$.^{5, 22, 28, 29, 30}



- 1 - kapalina
- 2 - nástroj
- 3 - brousící zrna
- 4 - přívod brousících zrn a kapaliny
- 5 - obrobek

Obr.4.4 Princip metody pro obrábění ultrazvukem²⁸



- 1 - nástroj
- 2 - obrobek

Obr. 4.5 Nástroj na závity²⁸

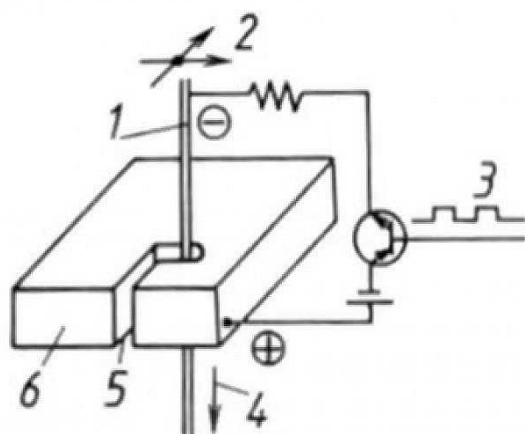
4.2 Nerotační plochy

4.2.1 Elektroerozivní obrábění pomocí drátkové elektrody

Principem elektroerozivního obrábění drátkovou elektrodou (EDM) je vytvoření výboje mezi anodou a katodou a vypaření požadované části povrchu obrobku (obr.4.6). Celý proces probíhá v tekutém dielektriku a lze jej uplatnit jen u elektricky vodivých materiálů. Jako dielektrikum se používá strojní olej, petrolej, destilovaná nebo deionizovaná voda. Anodu tvoří drát různých průměrů z mědi, mosazi nebo molybdenu. Katodou je v největším počtu případů obrobek.^{28, 29, 30}

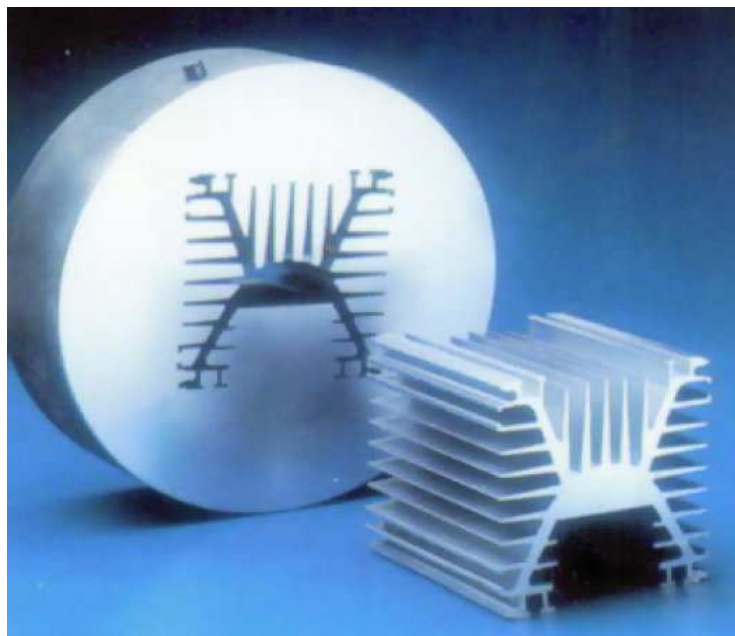
Při vlastním procesu výroby se drát odvíjí pomocí napínacího a odvíjecího mechanismu. Mezi ním a obrobkem vzniká elektrický výboj. Ve spojení s vhodným řídicím systémem se mohou obrábět i velmi složité tvary, viz obr.4.7.^{28, 29, 30}

Přesnost ovlivňují vlastnosti stroje, napnutí a vedení drátu, přesnost a spolehlivost řídicího systému, stabilita generátoru a kvalita dielektrika. Dosahuje se úběru $35 - 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a jakosti obrobeného povrchu $0,16 - 0,4 \mu\text{m}$. Maximální tloušťka řezu je 350 mm.^{28, 29, 30}



- 1 - drátová elektroda
- 2 - CNC řídicí systém
- 3 - generátor
- 4 - posuvu elektrody
- 5 - vyřezaná drážka
- 6 - obrobek

Obr.4.6 Elektroerozivní řezání pomocí drátkové elektrody ³⁰



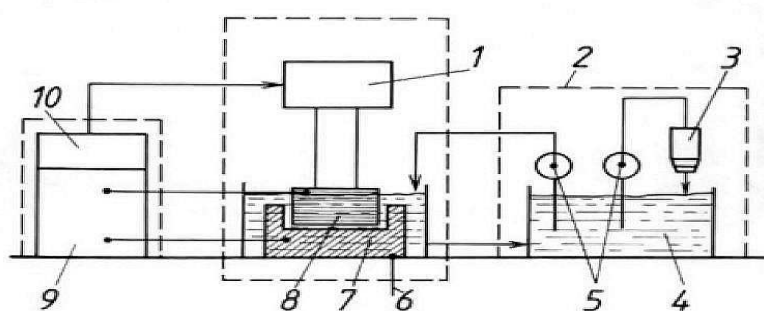
Obr.4.7 Příklad výrobku zhotoveného metodou EDM ³⁰

4.2.2 Vyjiskřování

Při vyjiskřování dochází k tvarování součásti do finální podoby a nebo k jejímu dělení roztavováním mikroskopických částic materiálu a jejich následným odplavováním. Proces probíhá při spojení materiálu s elektrodou v dielektrickém prostředí (obr.4.8). Metoda je použitelná jen v případě elektricky vodivých materiálů a hodí se k obrábění složitých a přesných tvarů z tvrdých materiálů. Nahrazuje zejména broušení, jelikož dosahuje drsnosti povrchu $0,2 \mu\text{m}$. ^{1, 30}

Jako elektroda (nástroj pro vyjiskřování) se nejčastěji využívá mosazný drát. Jeho průměr bývá v rozmezí $0,05$ až $0,36 \text{ mm}$. V některých případech se používá i hloubička z mědi, grafitu nebo měděného wolframu. Dielektrikum se musí od vytavených částic filtrovat. ^{1, 30}

Stroje se dodávají jako 4-osé (obr.4.9) a využívají se převážně v nástrojárnách na kusovou výrobu, např. pro výrobu dutin forem. Pro větší počty kusů se metoda využívá při výrobě fréz a vrtáků. ^{1, 30}



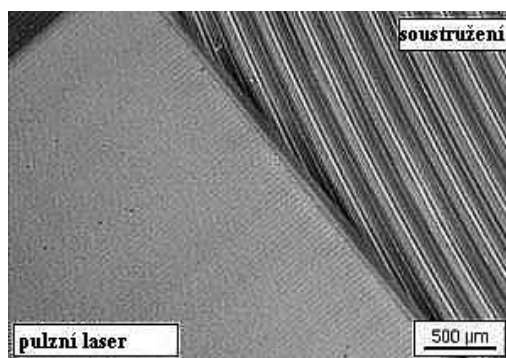
- 1 - pracovní hlava,
- 2 - filtrační zařízení,
- 3 - filtr,
- 4 - dielektrikum,
- 5 - čerpadlo,
- 6 - pracovní stůl,
- 7 - obrobek,
- 8 - nástrojová elektroda,
- 9 - generátor,
- 10 - CNC řídicí systém

Obr.4.8 Schéma vyjiskřování³⁰Obr.4.9 Stroj Mitsubishi EA12V Advance¹

4.2.3 Leštění pulzním laserem

Princip spočívá v odpařování nerovností a přetavení tenké vrstvy na povrchu součásti laserem. Cílem je povrchové leštění a vyhlazení za působení povrchového pnutí. Využívají se pulzní lasery s mikrosekundovou (případně nanosekundovou) délkou trvání paprsku, u kterých dochází k minimálnímu tepelnému ovlivnění struktury základního materiálu. Pohybem laseru a energií pulzu je možné ovládat hloubku odpařované vrstvy i průběh rozsahu úprav. Nerovnosti o velikosti 1 - 3 μm , které vznikly předchozí výrobní metodou, se vylepší až na drsnosti 0,1 - 0,2 μm .³³

Většinou se leští kovové materiály (nástrojové oceli), kde se využívá pevnolátkových Nd:YAG a Nd:YVO4 laserů. Nejlepší výsledků se dosahuje u tvářecích nástrojů a forem na zpracování plastů, pryže a skla. Porovnání povrchu se soustruženým je ukázáno na obr.4.10. 3, 33

Obr.4.10 Porovnání povrchu obrobceho pulzním laserem a soustružením^{3, 33}

5 POROVNÁNÍ METOD

Pro výběr vhodné metody se musí brát v potaz velké množství faktorů. Obráběný materiál, tvar a velikost obrobku, požadovaná drsnost a profil povrchu, dostupnost stojů a zařízení v podniku atd. Kvalita dosažených povrchů závisí především na zvolené metodě, dodržení řezných podmínek a použitých dokončovacích zařízeních.

Některé metody vyjmenované u dokončování vnějších ploch se dají úspěšně použít i na dokončení vnitřních ploch. Příkladem mohou být technologie jemného soustružení, jemného frézování, broušení apod. Přehledné zpracování a porovnání jednotlivých dokončovacích metod je uvedeno v tab.5.1. Hodnoty byly převzaty z konkrétních výrobních procesů firem zabývajících se uvedenými technologiemi. Za určitých podmínek by se dalo dosáhnout i lepších drsností, např.s využitím modernějších zařízení a při výrobě v tzv.,,laboratorních podmínkách“.

Tab.5.1 Porovnání jednotlivých dokončovacích metod z hlediska dosažitelné drsnosti

metoda	běžně dosažená drsnost [μm]	maximalně dosažitelná drsnost [μm]	použití
jemné soustružení	0,8	0,4	kovové i nekovové materiály, výrobky různých tvarů
jemné broušení	0,3	0,1	kalené povrchy, slinuté karbidy, keramika, řezné nástroje
kopírovací broušení	0,3	0,2	kalené povrchy, slinuté karbidy, keramika
ševingování	0,8	0,4	ozubená nekalená kola
lapování	0,1	0,05	kalené, nitrídané povrchy slinutých karbidů, písty, díry kluzných ložisek, ozubená kola.
superfinišování	0,15	0,025	oceli, skla, neželezné slitiny, nekovové materiály, plochy obráběcích strojů, včetně, klikové a vačkové hřídele
kuličkování	0,4	0,1	různě tvarované součásti s ocelí
jemné frézování	0,8	0,4	kovové i nekovové materiály, výrobky různých tvarů, formy
valečkování	0,4	0,16	uzavřené tvary z ocelových součástí
leštění	0,3	0,1	jakékoliv tvary ocelových součástí
tryskání	0,8	0,1	kovové součásti různých tvarů
etlektrochemické	1,6	0,2	elektricky vodivé materiály, tvar jakýkoliv
ultrazvuk	1,6	0,4	kovové i nekovové materiály mimo plastů, výrobky různých tvarů
vyjiskřování	0,8	0,5	elektricky vodivé materiály, tvar jakýkoliv
drátková metoda	0,7	0,2	elektricky vodivé materiály, tvary různé
leštění puzním laserem	0,2	0,1	různé tvary, libovolné materiály

Příkladem zaměnitelnosti dokončovacích metod může být např. nahrazení elektroerozivního obrábění při výrobě forem na vstřikování a lisování plastů frézováním malým průměrem frézy 0,6 - 2,5 mm s štíhlostním poměrem 10 až 15 (délka/průměr). Frézováním se zkrátí čas, sníží se výrobní náklady a odstraní se vliv velikosti hloubiček.

6 ZÁVĚR

K dosažení finální podoby součástí se používají dokončovací metody. Cílem je výrobky dovést k dokonalosti a přiblížit je ideálnímu tvaru získanému z výpočtu, simulace nebo návrhu designéra. V zásadě jde o zajištění optimální geometrie povrchu spolu s požadovanými mechanickými a estetickými vlastnostmi.

V praxi je snahou využít technologické operace, při kterých se požadované jakosti dosáhne již během výrobního procesu. Dodatečné dokončování pak již není potřebné. V převládající většině případů je však nutno zařadit do výroby operace navíc – tzv. dokončovací, které se mohou rozdělit podle základního principu na konvenční a nekonvenční.

Nekonvenční jsou založené na fyzikálních jevech nebo chemických reakcích bez silového působení nástroje. Příkladem je dokončování vyjiskřováním, elektroerozivní, elektrochemické, ultrazvukové a nebo leštění pomocí laseru.

U konvenčních metod se odstraňuje přídavek na dokončení silovým působením a v zásadě se rozlišují varianty bez úběru a s úběrem materiálu. Při technologiích bez úběru materiálu se využívá plastické deformace povrchu a mezi metody patří válečkování, tryskání, kuličkování, vibrační zpevňování a aerolap. U technologií s úběrem materiálu je během výrobního procesu ponecháno na plochách více materiálu, než je na finálním výrobku potřeba. Přebytek se následně odstraňuje, čímž se docílí konečného tvaru a úpravy. Jde o metody jemného a vysokorychlostního soustružení a frézování, dále pak broušení, ševingování, leštění, lapování a superfinišování.

Pro dokončování tvarově složitých ploch je většinou zapotřebí uplatnit kombinaci technologií. Jejich použití značně komplikuje dostupnost jednotlivých míst na součástce a jedinou nemusí být dosaženo požadovaného výsledku. Proto se rozděluje i podle jiného hlediska – např. podle umístění ploch - na vnější a vnitřní, ať už jde o rotační či nerotační.

Již objevené technologie dokončování se dynamicky rozvíjejí a vylepšují. Významnou inovací se stává zdokonalování základních principů, např. malými změnami v geometrii nástroje, úpravou vlastností brusiva nebo úpravou vlastností materiálů. Nově se začíná rozvíjet i lineární pohon u obráběcích strojů a dosahuje nečekaně dobrých výsledků.

RESUMÉ

Obsahem práce je přehled metod pro dokončování tvarových ploch. Kromě běžně používaných jsou zmíněny i nové, které teprve nacházejí uplatnění ve strojírenské praxi. Součástí jsou i moderní metody, které pochází stadiem vývoje a u kterých se v nejbližší době očekává zavedení do běžného provozu.

Je uvedeno přehledné rozdělení a pro plochy vnější a vnitřní je k jednotlivým technologiím zpracován jak popis, tak i doporučení pro praxi. Z popisu jednotlivých principů a způsobů dokončování vystupuje přehled výhod a nevýhod. Jsou uvedeny varianty s úběrem i bez úběru materiálu.

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List
---------	------------------	------

Seznam použitých zdrojů

1. EDM trade s.r.o. [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. Www.edmtrade.cz. Dostupné z WWW: <1. <http://www.edmtrade.cz/hloubicky-detail/mitsubishi-ea12v.html>>.
2. Edmex, s.r.o. [online]. 2009 [cit. 2011-02-09]. Www.peps3d.cz. Dostupné z WWW: <http://www.peps3d.cz/images/pics_gallery/iepc0_job_04.jpg>.
3. GSI laser [online]. 2010 [cit. 2011-02-10]. Www.gsiglasers.com. Dostupné z WWW: <<http://www.gsiglasers.com/UserFiles/Documents/WhitePapers/LaserHeatTreatment.pdf>>.
4. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2 část* [online]. Brno: CERM, 2004 [cit. 2011-01-30]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf>.
5. KARAFIÁTOVÁ, Stanislava; LANGER, Ivo. *Nekonvenční technologie*. Praha: Fragment, 1998. 164 s.
6. Krejčí Pavel blog [online]. 2006 [cit. 2011-02-10]. Www.pavkrej.wz.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.pavkrej.wz.cz/index.php?page=texty/texty>>.
7. MÁDL, Jan, et al. *Technologie obrábění*. Praha : ČVUT, 2007. 88 s.
8. Micronplus [online]. 2009 [cit. 2011-02-10]. Www.micronplus.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.micronplus.cz/fotogalerie>>.
9. Micronplus [online]. 2009 [cit. 2011-02-20]. Www.micronplus.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.micronplus.cz/plstene-koutouce>>.
10. Misan, s.r.o. [online]. 2002 [cit. 2010-04-25]www.misan.cz]. Www.misan.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.misan.cz/okamoto/katalog-detail/aerolap-aerolap---dokoncovani-funkcnich-ploch--do--zrcadloveho-lesku>>.
11. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/britove-desticky-z-cermetu>>.
12. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-frezovani-kalenych-oceli-pri-vyrobe-zapustek>>.
13. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>>.
14. MM Průmyslové spektrum [online]. 2003 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-brouseni-vnejsich-ploch-dokulata>>.
15. MM Průmyslové spektrum [online]. 2003 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezna-keramika-a-kubicky-nitrid-boru>>.
16. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenych-materialu-reznou-keramikou>.
17. MM Průmyslové spektrum [online]. 2009 [cit. 2011-03-20]. Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vybaveni-pro-ostreni-a-vyrobu-reznych-nastroju>>.

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List
---------	------------------	------

18. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2011-03-20].
Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeci-centra-s-linearnim-pohonem>>.
19. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 26.4. 2010 [cit. 2011-02-10].
Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeci-centra-a-stroje-soustruznickeho-typu>>.
20. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2011-03-20].
Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-frez-urcujici-trendy-vysokorychlostniho-obrabeni>>.
21. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2011-03-20].
Www.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite>>.
22. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň : VČU, 1999. 102 s.
23. *Octopustools s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. Wwww.octopustools.com.
Dostupné z WWW:
<http://www.octopustools.com/Valeckovani/info_valeckovani.php>.
24. OBEŠLOVÁ, Viera. *SPS Kolín* [online]. 2009 [cit. 2010-04-25]. Wwww.sps-ko.cz.
Dostupné z WWW: <http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9B%C3%AD.pdf>.
25. OBEŠLOVÁ, Viera. *SPS Kolín* [online]. 2009 [cit. 2010-04-25]. Wwww.sps-ko.cz.
Dostupné z WWW: <http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Brou%C5%A1en%C3%AD-obr%C3%A1zky.pdf>.
26. POTÁCEL, Václav. *Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění*. Praha : VUTUM, 2004. 252 s.
27. *Precitool* [online]. 2009 [cit. 2011-02-09]. Wwww.precitool.cz. Dostupné z WWW:
<<http://www.precitool.cz/cz/wp-content/uploads/file/Utvarece%20FF-FM%20CZ%20screen.pdf>>.
28. ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2010-04-25]. Wwww.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil>>.
29. ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2010-04-25]. Wwww.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>.
30. ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2010-04-25]. Wwww.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
31. *SPS strojnická Plzeň* [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. /museum.spstrplz.cz.
Dostupné z WWW: <<https://museum.spstrplz.cz/virtmus/Stranky%20wikiwebu/Stroj%C3%ADrensk%C3%A1%20technologie%20-%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.aspx>>.
32. *Supfina* [online]. xxx [cit. 2011-02-10]. Wwww.supfina.com. Dostupné z WWW:
<http://www.supfina.com/Bilder/supfin_BallFlex_d.pdf>.
33. ŠMÍD, Jiří. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2010-04-25].
Wwww.mmspektrum.com. Dostupné z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem>>.

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List
---------	------------------	------

34. *I. Toušeňská s.r.o.* [online]. 2000 [cit. 2011-02-10]. Wwww.1tousenska.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.1tousenska.cz/sluzby.php>>.
35. *I. Toušeňská s.r.o.* [online]. 2000 [cit. 2011-04-16]. Wwww.1tousenska.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.1tousenska.cz/sluzby.php?sub=7>>.
36. *Tyrolit* [online]. 2011 [cit. 2010-04-25]. Wwww.tyrolit.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.tyrolit.cz/page.cfm?vpath=divisions/prec machining/startechp>>.
37. *Unit plus s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-02-10]. Wwww.unitplus.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.unitplus.cz/cz/vyrobky/valeckovani/>>.
38. *VTN - Servis, s.r.o.* [online]. 2004 [cit. 2010-04-25]. Wwww.vtn.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.vtn.cz/brusne-nastroje-knb/>>.
39. *WNT* [online]. 2010 [cit. 2011-02-10]. Wwww.wnt.com. Dostupné z WWW: <http://www.wnt.com/presse_CSY_HTML.htm>.
40. *Yamashita Works* [online]. 2010 [cit. 2011-02-10]. Wwww.yamashitaworks.co.jp. Dostupné z WWW: <<http://www.yamashitaworks.co.jp/jp/aerolap.html>>.